

Ал ДЖОЖО Ф.  
Д. В. ЗЕЛЕНЦОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОСНОВНОМ ГЕНЕРАТОРЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ НА ВОДНОМ РАСТВОРЕ БРОМИДА ЛИТИЯ

DETERMINATION OF OPERATING TEMPERATURE IN MAIN GENERATOR  
OF A TWO-STAGE ABSORPTION REFRIGERATION MACHINE WORKING  
ON AN AQUEOUS SOLUTION OF LITHIUM BROMIDE

Рассмотрены тепловые характеристики двухступенчатой абсорбционной холодильной машины. Численный анализ показал, что температура вторичного генератора не является постоянной. Также выяснилось, что холодильный коэффициент сначала значительно возрастает, а затем стабилизируется на определенном значении температуры главного генератора, но этот результат не представляет собой подходящую величину для расчета холодильного контура абсорбционной холодильной машины, поскольку он вызывает кристаллизацию в контуре. Это было проверено на основе схемы термодинамических ( $h-X-T$ ) связей раствор бромид лития – вода. Решающим моментом в определении соответствующей температуры является изучение изменения холодильной мощности в процессе изменения температуры генератора. При этом расчетная температура основного генератора должна находиться в диапазоне между температурой, соответствующей наибольшей холодильной мощности, и температурой, далекой от явления кристаллизации.

**Ключевые слова:** абсорбционная холодильная машина, водный раствор бромида лития, двойной эффект, температура основного генератора, температура вторичного генератора, явление кристаллизации

*This paper examines the thermal characteristics of a two-stage absorption refrigeration machine. When carrying out a numerical analysis, it turned out that the secondary generator's temperature was not constant, and it was also found that the coefficient of thermal performance of this cycle increased significantly at the beginning, then stabilized at a certain value for the temperature degree of the primary generator. But this result is not the right value for calculating the absorption refrigeration cycle; it might cause crystallization inside the cycle and This was verified based on the thermodynamic relationship chart ( $h-X-T$ ) for LiBr-water solution. In addition, the decisive point for determining the appropriate temperature is to study the change in refrigeration capacity in the process when the temperature of the generator changes. In this case, the design temperature for the primary generator should be in the range between the temperature corresponding to the highest refrigeration capacity and the temperature far from the crystallization phenomenon.*

**Keywords:** absorption refrigeration cycle, LiBr-water solution, double effect, Primary generator temperature's, Secondary generator temperature's, Crystallization phenomena

Растущий спрос на энергию предвещает, с одной стороны, резкое сокращение запасов ископаемого топлива, а с другой – чрезмерное потребление этих источников привело к многочисленным экологическим проблемам, заставив весь мир искать альтернативные и, желательно, возобновляемые источники энергии. Одним из наиболее важных из этих источников является солнечная энергия, которая характеризуется способностью покрывать различные нагрузки, как тепловые, так и электрические [1, 2]. Например, системы кондиционирования и охлаждения, работаю-

щие с использованием парокомпрессионных холодильных установок, потребляют электрическую энергию [3]. В больших количествах используемые в них хладагенты оказывают вредное воздействие на окружающую среду, особенно на озоновый слой. Парокомпрессионная холодильная машина состоит из четырех основных элементов, как показано на рис. 1: компрессора, конденсатора, испарителя и расширительного (терморегулирующего) клапана. Контур работает на двух уровнях давления: низком (давлении испарения) и высоком (давление конденсации).

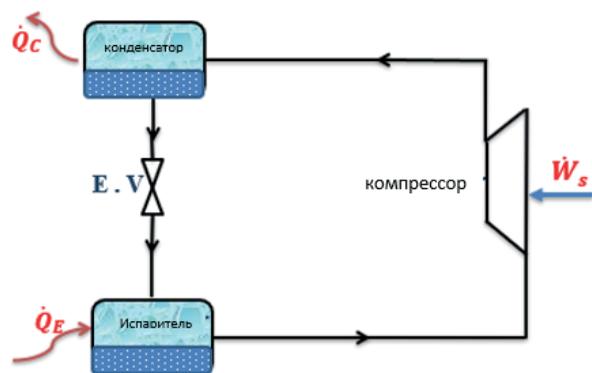


Рис. 1. Схема парокомпрессионной холодильной установки

Fig. 1. Steam Compression Refrigeration Unit Diagram

Важнейшим фактором в системах кондиционирования воздуха, отличающим одну установку от другой, является холодильный коэффициент (коэффициент энергоэффективности)  $\epsilon$  (EER), который равен отношению отводимой энергии (холодопроизводительности) к потребляемой энергии.

Энергия, потребляемая в контуре холодильного оборудования под давлением, является электрической энергией. Причем следует отметить, что электрическая энергия является вторичной энергией, и, соответственно, не учитываются многочисленные потери, накопленные в результате процесса преобразования первичной энергии (например сжигание метана) во вторичную энергию (электрическую энергию). Поэтому высокое значение  $\epsilon$  в схеме не считается достаточно приемлемым показателем для сравнения ее с другими холодильными схемами. Следует также отметить, что наиболее энергозатратным элементом (с энергетической точки

зрения) в схеме является компрессор. Можно ли обойтись без него? И как другим способом поднять давление паров хладагента, вырабатываемых в испарителе, от низкого (давления испарения) до высокого (давления конденсации)? Этого можно достигнуть за счет использования свойств растворов, состоящих из двух веществ: абсорбента и абсорбируемого в нем вещества (в данном случае хладагента). При нагреве раствора хладагент выделяется из раствора.

Существует несколько типов абсорбционных холодильных машин, самой простой из которых является одноступенчатая абсорбционная холодильная машина, показанная на рис. 2, имеющая два уровня давления, где компрессор заменен генератором и абсорбционной емкостью, а хладагент, используемый в парокомпрессионных холодильных машинах, заменяется двухкомпонентным раствором: охлаждающим элементом (хладагентом) и абсорбционным элементом (абсорбентом). Водный раствор бромида лития считается одним из наиболее широко используемых растворов.

При нагревании раствора в генераторе пары хладагента высвобождаются за счет подаваемого тепла, затем хладагент конденсируется в конденсаторе. Его давление снижается в расширительном клапане до давления испарения, а затем он испаряется в испарителе, возвращается в поглотительный резервуар (абсорбер) для поглощения раствором (абсорбентом) с низким содержанием хладагента, возвращающимся из генератора [4].

Необходимо отметить, что пар, образующийся в генераторе, имеет высокую температуру, поэтому в контуре образуются большие тепловые потери. Пар можно утилизировать путем пропускания через второй генератор для нагрева раствора, возвращающегося из основ-

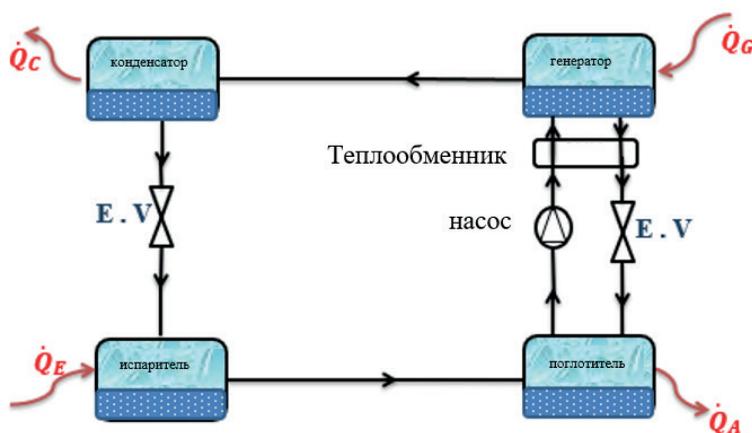


Рис. 2. Схема одноступенчатой абсорбционной холодильной машины

Fig. 2. Diagram of a single-stage absorption refrigerating machine

ного генератора, при этом выделяется дополнительное количество паров хладагента, что способствует увеличению производительности охлаждения и, как следствие, увеличению теплового коэффициента полезного действия контура. Такая холодильная машина называется двухступенчатой. В данной работе проводится исследование подобного абсорбционного холодильного контура с целью увеличения его эффективности [5].

На рис. 3 показана принципиальная схема двухступенчатой абсорбционной холодильной машины, работающей на растворе воды и бромида лития. Машина работает при трех давлениях контура: низком давлении (давление испарения), среднем (давление конденсации) и высоком (давление вторичного генератора). Схема состоит из нескольких сосудов, в которых происходят различные процессы массо- и теплообмена: главный генератор – генератор 1, вторичный генератор 2, абсорбер, испаритель, основной теплообменник и вторичный генератор, насос и расширительный клапан [6, 7]. Раствор нагревается в главном генераторе, богатом газообразным хладагентом, что приводит к выделению паров хладагента в точке (1) при

высокой температуре, используемой для нагрева раствора. Он возвращается от основного генератора в точке (11) к вторичному генератору, и таким образом дополнительный охлажденный пар высвобождается в точке (17), затем он конденсируется в конденсаторе, в то время как пар, вырабатываемый основным генератором, конденсируется во вторичном. Его объем добавляется к количеству, выделяющемуся во вторичном генераторе, и общий объем после конденсации в точке (4) поступает в испаритель для получения необходимого количества холода.

Любая тепловая схема описывается двумя основными параметрами: количеством (количеством тепла, измеряемым в джоулях) и уровнем (температурой, измеряемой в градусах Цельсия), которые иногда трудно определить однозначно количественно, что может привести к дефектам. При работе машины, работающей на водном растворе бромида лития, следует учитывать такое свойство, как явление кристаллизации, которое может возникнуть в контуре, в котором в качестве кристаллизующего агента используется литий. Абсорбционный элемент бромид лития – твердое (нелетучее) вещество, поэтому важно точно

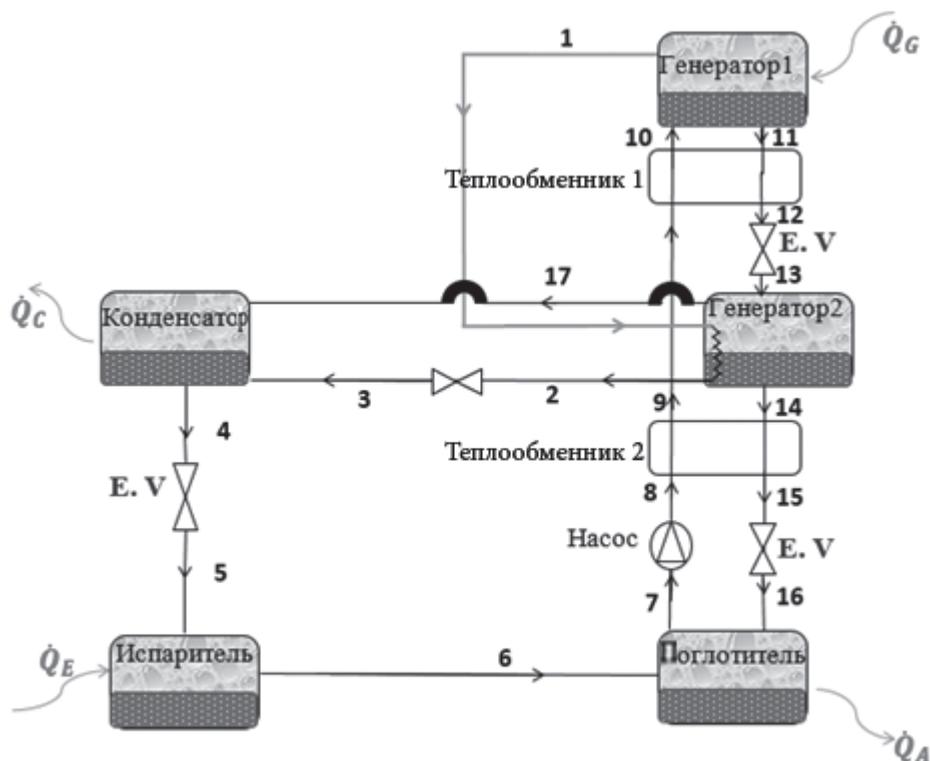


Рис. 3. Схема холодильного контура двухступенчатой абсорбционной холодильной машины, работающей на водном растворе бромида лития

Fig. 3. Diagram of the cooling circuit of a two-stage absorption refrigeration machine operating on an aqueous solution of lithium bromide

определить подходящую температуру для работы основного генератора.

В данном исследовании изучались тепловые характеристики контура охлаждения, а именно изменение эффективности контура охлаждения при различных температурах основного генератора (температура вторичного генератора остается постоянной). Исследование показало, что с увеличением температуры основного генератора холодильный коэффициент уменьшается, как показано на рис. 4. Но это нелогично и противоречит тепловым характеристикам схемы, так как повышение температуры основного генератора приводит к увеличению количества выделяемых паров хладагента. Таким образом, увеличение эффективности охлаждения превышает увеличение теплового потока, требуемого в главном генераторе, что должно приводить к высокому значению  $\varepsilon$  (EER). Такая схема термически неуравновешенна, поскольку температура вторичного генератора остается постоянной, в то время как температура основного генератора изменяется [8].

Следовательно, температура вторичного генератора напрямую связана с температурой основного генератора. При изменении температуры основного генератора изменяется температура вторичного генератора, как показано на рис. 5, где видно, что зависимость между температурами основного и вторичного генераторов принимает линейную форму, а соотношение между ними колеблется в пределах от 1,49 до 1,52 и выражается в виде

$$T_{g2} = 0.6232 \times T_{g1} + 5.7827 . \quad (1)$$

Поэтому для определения температуры вторичного генератора необходимо изучить тепловой баланс схемы в целом путем построения зависимости изменения температуры основного генератора с погрешностью, возникающей из-за теплового дисбаланса системы, которая рассчитывается по следующему уравнению (путем вычитания потоков энергии, выходящих из цепи, из потоков энергии, поступающих в цепь):

$$\dot{Q}_{G1} + \dot{Q}_E = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C . \quad (2)$$

По результатам расчета видно, что кривая сначала уменьшается, пока не достигнет предельной точки, с ошибкой теплового баланса, равной нулю, после чего ошибка снова увеличивается. Таким образом, в данной точке устанавливается рабочая температура вторичного генератора, как показано на рис. 6, следовательно, изменение температуры зависит от основного и вторичного генераторов.

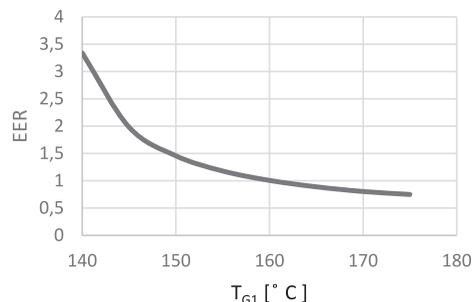


Рис. 4. Изменение холодильного коэффициента абсорбционного холодильного контура в зависимости от изменения температуры основного генератора

Fig. 4. Change in the refrigeration coefficient of the absorption refrigeration circuit depending on the change in the temperature of the main generator

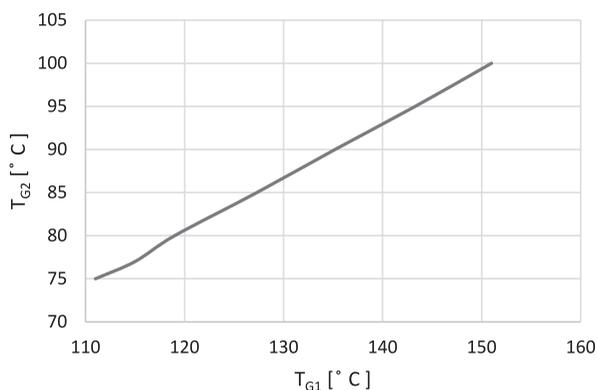


Рис. 5. Изменение температуры вторичного генератора в зависимости от изменения температуры основного генератора

Fig. 5. Change in temperature of the secondary generator depending on the change in temperature of the main generator

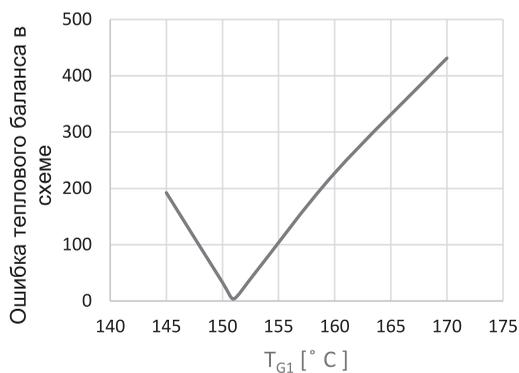


Рис. 6. Изменение температуры основного генератора в зависимости от величины дисбаланса

Fig. 6. Change in the temperature of the main generator depending on the unbalance value

Далее производился тепловой расчет контура, где первоначально определяются давления, действующие в контуре: давление испарения, соответствующее температуре испарения, и давление конденсации, соответствующее температуре конденсации по логарифмической диаграмме  $\log(p) - X - T$  для раствора бромида лития с водой. Как показано на рис. 7, при давлении конденсации выбирается точка, расположенная непосредственно перед точкой пересечения линии давления конденсации с кривой кристаллизации (чтобы гарантировать, что кристаллизации не происходит), которая представляет собой максимальную температуру вторичного генератора. В результате можно определить концентрацию раствора, выходящего из вторичного генератора, помимо его температуры, что также приводит к определению рабочего давления в основном генераторе.

Таким образом определяется три рабочих давления в контуре, а рабочая температура в основном генераторе рассчитывается по описанному выше методу (расчет теплового баланса в каждой точке).

Затем рассчитывают значение коэффициента энергоэффективности  $\varepsilon$  (EER) при различных значениях температуры основного генератора [9], изучая его изменение в целом в зависимости от изменения температуры основного генератора (рис. 8).

Из рис. 8 видно, что по мере увеличения температуры основного генератора холодильный коэффициент вначале значительно увеличивается, далее его прирост постепенно снижается с увеличением температуры основного генератора и затем начинает стабилизироваться, при этом наибольшее значение  $\varepsilon$  (EER) составляет

1,6 при температуре 150 °С. Как уже говорилось, особенность абсорбционной холодильной машины, работающей на системе бромид лития – вода, заключается в риске возникновения кристаллизации в контуре, в связи с чем безопасность контура должна быть обеспечена при этом значении.

Концентрация раствора, выходящего из основного генератора, составляет 58,43 % при температуре 150 °С, а концентрация раствора, выходящего из вторичного генератора, равна 66,14 %. Оба значения довольно далеки от кристаллизации в контуре, что показано на диаграмме термодинамических связей раствор бромид лития – вода ( $h-X-T$ ) на рис. 9. Поскольку на линии раствора, выходящей из вторичного генератора, имеется теплообменник, раствор попадает в зону кристаллизации при температурах, превышающих 135 °С.

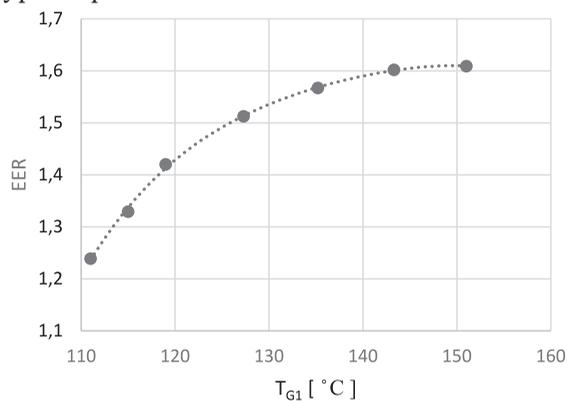


Рис. 8. Изменение холодильного коэффициента в зависимости от температуры основного генератора  
Fig. 8. Change in refrigeration coefficient depending on the temperature of the main generator

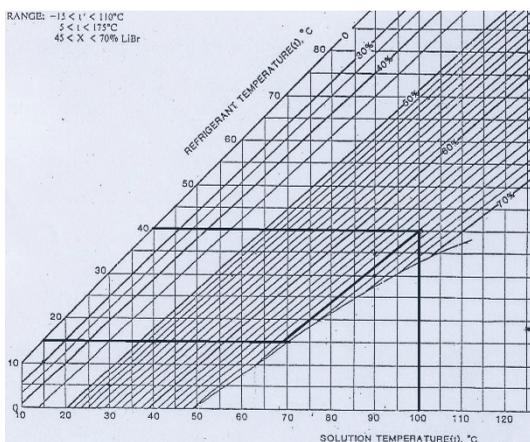


Рис. 7. Диаграмма  $\log(p) - X - T$  термодинамических связей раствора бромида лития – вода  
Fig. 7.  $\log(p) - X - T$  diagram of thermodynamic bonds lithium bromide – water solution

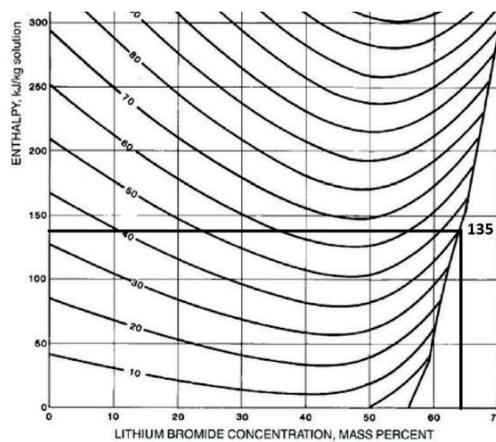


Рис. 9. Диаграмма  $(h-X-T)$  термодинамических связей раствора бромида лития в воде  
Fig. 9. Diagram of  $(h-X-T)$  thermodynamic bonds of lithium bromide solution in water

Поэтому схема должна быть рассчитана на температуру ниже 135 °С. В результате решающим фактором при определении подходящей рабочей температуры для схемы является значение изменения эффективности схемы при изменении температуры основного генератора [10], как показано на рис. 10.

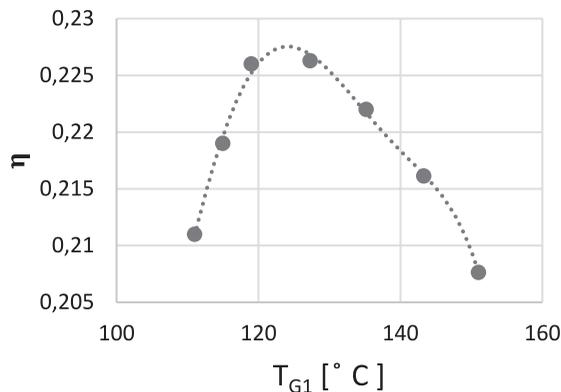


Рис. 10. Изменение эффективности схемы при изменении температуры основного генератора  
Fig. 10. Change of circuit efficiency in case of main generator temperature change

Из рис. 10 видно, что по мере увеличения температуры основного генератора выходная мощность сначала резко увеличивается, пока не достигает экстремума, а затем начинает уменьшаться с увеличением температуры из-за роста тепловых потерь. При этом максимальное выходное значение составляет 0,2263 при температуре 123 °С.

**Вывод.** Таким образом, для наибольшего эффекта проектирование должно осуществляться для температуры, соответствующей более высокому значению EER, и температуры, далекой от явления кристаллизации. Поэтому наиболее оптимальной будет схема при проектировании с температурой основного генератора 130 °С, что далеко от температуры кристаллизации и обеспечивает наибольшее соотношение температур 1,52 и эффективность 0,225.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захидов Р.А., Давлонов Х.А. Перспективы солнечных систем охлаждения зданий на основе абсорбционных холодильных машин // Альтернативная энергетика. 2022. Т. 5, № 2. С. 7–10.
2. Чиркова Е.В. Использование теплоты солнечной энергии в животноводческих зданиях // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 56–62. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.8.

3. Едуков Д.А., Сайманова О.Г., Едуков В.А. Исследование энергоэффективности системы кондиционирования воздуха с вторичным охлаждающим контуром // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 1 (50). С. 67–73. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.9.

4. Мереуца Е.В., Сухих А.А. Анализ энергетической эффективности системы кондиционирования на базе абсорбционной холодильной машины с подключением теплонасосной установки и солнечных коллекторов // Проблемы региональной энергетики. 2023. № 1 (57). С. 99–110.

5. Suhail Ahmad Khan. "Comparative analysis of single and double effect LiBr-water absorption system". 4th International Conference on Recent Innovations in Sciences Engineering and Management. March 2016.

6. Mohammad Seraj, M.Altamush Siddiqui. "Performance Analysis of Parallel flow single and double effect absorption cycles". International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. V. 2. I. 5. May 2013.

7. Khagendra Kumar Upman., B.L. Gupta., Dhananjay Kumar., Prashant Kumar Baheti. "Design and Performance Analysis of Solar Powered Absorption Cooling System for Computer Laboratory". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). V.04. I. 06. June 2017.

8. Rabi Karaali. "Exergy Analysis of double – effect absorption cycles". International journal of engineering sciences & research technology. December. 2016.

9. Farid Nasir Ani. "Double Effect Solar Absorption thermal energy storage". Journal Mekanikal. N. 35. P. 38–53. December 2012.

10. H. Al-Tahaine, M. Frihat, M. Frihat, M. Al-Rashdan. "Exergy Analysis of a Single-Effect Water-Lithium Bromide Absorption Chiller Powered by Waste Energy Source for Different Cooling Capacities". Energy and Power 2013.

## REFERENCES

1. Zakhidov R.A., Davlonov H.A. Prospects of solar cooling systems for buildings based on absorption refrigeration machines. *Al'ternativnaya jenergetika* [Alternative Power Engineering], 2022, vol. 5, no. 2, pp. 7–10. (in Russian)
2. Chirkova E.V. Use of Solar Energy Heat in Animal Breeding Buildings. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban construction and Architecture], 2019, vol. 9, no. 3, pp. 56–62. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.8
3. Edukov D.A., Saymanova O.G., Edukov V.A. Energy Efficiency Study of Air Conditioning System with Secondary Cooling Circuit. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 1 (50), pp. 67–73. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.9
4. Mereutsa E.V., Sukhikh A.A. Analysis of energy efficiency of the air conditioning system based on an absorption refrigeration machine with connection of a heat pump plant and solar collectors. *Problemy*

*regional'noj jenergetiki* [Regional Energy Challenges], 2023, no. 1 (57), pp. 99–110. (in Russian)

5. Suhail Ahmad Khan. "Comparative analysis of single and double effect LiBr-water absorption system". 4th International Conference on Recent Innovations in Sciences Engineering and Management. March 2016.

6. Mohammad Seraj, M.Altamush Siddiqui. "Performance Analysis of Parallel flow single and double effect absorption cycles". International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. V. 2. I. 5. May 2013.

7. Khagendra Kumar Upman., B.L. Gupta., Dhananjay Kumar., Prashant Kumar Baheti. "Design and Performance Analysis of Solar Powered Absorption Cooling System for Computer Laboratory". International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). V.04. I. 06. June 2017.

8. Rabi Karaali. "Exergy Analysis of double – effect absorption cycles". International journal of engineering sciences & research technology. December. 2016.

9. Farid Nasir Ani. "Double Effect Solar Absorption thermal energy storage". Journal Mekanikal. N. 35. P. 38–53. December 2012.

10. H. Al-Tahaine, M. Frihat, M. Frihat, M. Al-Rashdan. "Exergy Analysis of a Single-Effect Water-Lithium Bromide Absorption Chiller Powered by Waste Energy Source for Different Cooling Capacities". Energy and Power 2013.

Об авторах:

#### **Ал ДЖОЖО Ферас**

аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: feras.algogo@mail.ru

#### **Al GOGO Feras**

Postgraduate student of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: feras.algogo@mail.ru

#### **ЗЕЛЕНЦОВ Данила Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: tgv@samgtu.ru

#### **ZELENTSOV Danila V.**

PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194 E-mail: tgv@samgtu.ru

Для цитирования: Ал Джожо Ф., Зеленцов Д.В. Определение рабочей температуры в основном генераторе двухступенчатой абсорбционной холодильной машины, работающей на водном растворе бромида лития // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 1. С. 55–61. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.07.

For citation: Al Gogo F., Zelentsov D.V. Determination of Operating Temperature in Main Generator of a Two-stage Absorption Refrigeration Machine Working on an Aqueous Solution of Lithium Bromide. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 1, pp. 55–61. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.07.